

ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O. C. Vilela e N. Fraidenraich

Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia (FAE) – Departamento de Energia Nuclear (DEN)

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Av. Prof. Luiz Freire, 1000, 50740-540, Recife (PE), Brasil

Fone/Fax: +55 81 3271-8252 / 3227-1183

e-mail: ocv@npd.ufpe.br

RESUMEN: En este trabajo analizamos el comportamiento dinámico de un sistema de abastecimiento de agua. Registros del caudal de agua consumida, del caudal bombeado y de radiación solar colectada fueron obtenidos para un sistema instalado en la región semiárida del estado de Pernambuco (ciudad de Inajá), Brasil, durante dos períodos, a lo largo de los meses de marzo-abril y del mes de julio. La potencia nominal del generador fotovoltaico es 1,1 kW y el nivel estático del pozo es 23,7m. Un sistema de almacenamiento, de 14 m³ de capacidad, permite adaptar el suministro de agua al consumo. El trabajo presenta herramientas metodológicas útiles para estudiar el desempeño del sistema: a) Curva característica del sistema de bombeo; b) Estimativa de la capacidad de bombeo; c) Balance entre consumo y oferta de agua o, su equivalente, variación de la cantidad de agua acumulada en el reservatorio y d) Determinación de parámetros relativos a la capacidad de bombeo y a la capacidad de almacenamiento, que pueden ser utilizados para predecir el comportamiento a largo plazo del sistema. Estimativas realizadas a partir de valores registrados muestran que el sistema tiene capacidad para bombear 15% más de agua que la cantidad efectivamente bombeada durante el mes de menor radiación solar a lo largo del año (julio). El volumen del tanque de agua es 22% mayor que la demanda. A pesar de que la capacidad de bombeo durante ese mes es mayor que la demanda, y no fue observado déficit durante el período analizado, los resultados de una simulación a largo plazo muestran que sistemas con esas características habrán de experimentar déficit en el suministro de agua durante su funcionamiento.

Palabras claves: Bombeo fotovoltaico-1: Abastecimiento de agua-2: Análisis de desempeño.-3

INTRODUÇÃO

Diversos programas de instalação de sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água têm sido desenvolvidos no Brasil. Dentre as iniciativas governamentais destaca-se o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM) pelo número de sistemas instalados (algumas centenas) e pela continuidade de suas atividades. Entre os sistemas instalados, o tipo mais comum utilizado no nordeste do Brasil é o de sistemas comunitários, ou seja, sem rede de distribuição.

Uma preocupação permanente em relação a essas instalações refere-se à necessidade de garantir seu bom funcionamento ao longo da vida útil. Instalados muitas vezes em condições bastante adversas, afastados de centros povoados, com escassa assistência técnica, dificuldades para adquirir peças de reposição, considera-se de interesse estabelecer uma metodologia que permita avaliar periodicamente seu desempenho e identificar problemas que possam ocorrer, contribuindo dessa forma para o que se denomina “sustentabilidade” da tecnologia.

Com esse propósito, um sistema instalado no interior do Estado de Pernambuco foi objeto de estudo, tendo sido monitorado ao longo de um período total de 66 dias. Foram realizadas medidas da vazão de água consumida (\dot{V}_C), vazão de água bombeada (\dot{V}), e radiação solar coletada pelo gerador (I_{col}). As duas últimas grandezas permitem caracterizar univocamente o sistema de bombeamento estudado (Fraidenraich e Vilela, 2000). Utilizando-se séries temporais reais de radiação solar e a curva característica do sistema (\dot{V} vs. I_{col}), foi estimado o máximo volume de água diário que o sistema pode bombear.

Na próxima seção, descrevemos as características operacionais do sistema fotovoltaico de abastecimento de água analisado e a seguir apresentamos ferramentas metodológicas úteis para estudar seu desempenho: a) Curva característica (\dot{V} vs. I_{col}); b) Estimativa da capacidade de bombeamento; c) Balanço entre consumo e oferta de água (variação da quantidade de água acumulada no reservatório) e d) Determinação de parâmetros relativos à capacidade de bombeamento e a capacidade de armazenamento, que podem ser utilizados para prever o comportamento a longo prazo do sistema. Finalmente, os resultados da análise são discutidos com o auxílio de um modelo de simulação do sistema.

CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O sistema analisado se encontra instalado no município de Inajá, PE-Brasil. O gerador fotovoltaico é composto de 21 módulos de silício monocristalino com potência nominal de 1113 W. Um inversor de 1500 W, com seguidor do ponto de máxima potência é acoplado a um conjunto moto-bomba com motor assíncrono trifásico e uma bomba centrífuga de 10 estágios com uma capacidade nominal de bombeamento de 3 m³/h. A moto-bomba é instalada dentro de um poço a uma

profundidade de 48 m. O poço tem 82,7 m de profundidade e nível de água estático igual a 23,7 m. O rebaixamento máximo, para uma vazão de água bombeada de 4 m³/h, é de 45 m. Um tanque de armazenamento de 14 m³ atende à demanda amenizando irregularidades eventuais no suprimento de água bombeada. As observações foram realizadas ao longo de dois períodos bastante distintos no que se refere à radiação solar e à demanda de água. O período de 08 de março a 14 de abril com alta radiação e baixo consumo, e o período de 04 a 31 de julho com baixa radiação e alto consumo, denominado período crítico.

A avaliação de um sistema de abastecimento de água requer uma análise global do seu comportamento. Fatores importantes como: a) Radiação solar mínima para iniciar a operação da bomba (nível crítico de radiação solar, (I_C)), b) Eficiência do sistema e c) Relação entre o tamanho do reservatório de água, capacidade de bombeamento do sistema e demanda de água, serão considerados.

Cortes na operação da moto-bomba

Normalmente, a demanda de água ocorre durante o período diurno. O período de bombeamento varia de acordo com o comportamento da radiação solar e, em particular, com a radiação solar mínima necessária para iniciar a operação do sistema (nível crítico, (I_C)). Devido à natureza estocástica da radiação solar, durante alguns períodos, o sistema pode não bombear, se o nível de radiação solar coletada é menor do que (I_C) ou o volume de água bombeado pode não ser suficiente para atender à demanda. O tanque de armazenamento atua portanto como um dispositivo de adaptação do fornecimento de água à demanda, reduzindo os períodos de déficit. Uma ilustração do efeito do nível crítico na operação do sistema de bombeamento pode ser vista na Fig. 1, onde estão representados, para um dia, a radiação solar coletada, a vazão de água bombeada e o nível do tanque de armazenamento. O sistema começa a operar pela manhã, assim que o nível de radiação solar se torna igual a (I_C) (em torno de 170 W/m²) e deixa de operar no fim do dia, quando o nível de radiação se aproxima novamente de (I_C). Às 11:20h da manhã, observa-se também uma parada do sistema devido a uma queda no nível da radiação solar.

É importante destacar que o nível crítico de radiação solar depende da potência do gerador FV, das características da moto-bomba, das alturas estática e dinâmica de recalque a serem superadas pelo sistema de bombeamento. Para um determinado sistema de bombeamento, o nível crítico será tanto menor quanto maior seja a potência do gerador fotovoltaico.

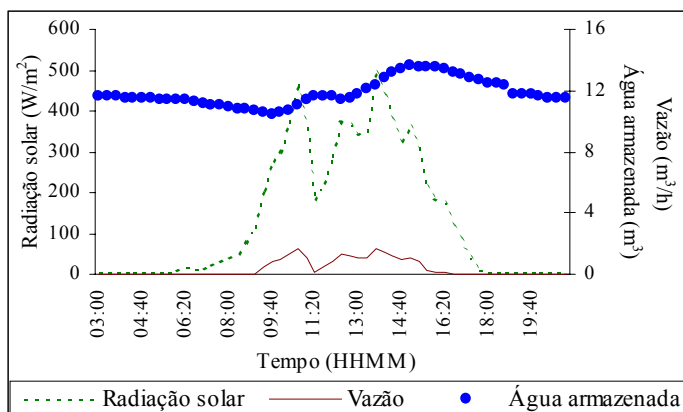


Figura 1 Corte na operação da bomba devido ao efeito do nível crítico de radiação solar (dia 21/03/97).

O tamanho do reservatório também tem influência considerável no desempenho global do sistema. Um tanque de água pequeno pode resultar em um grande desperdício da capacidade de bombeamento, desde que o mesmo ficará cheio durante a maior parte do dia. Um corte na operação da bomba devido a esse fator é ilustrado na Fig. 2 (entre 13:30 e 14:40 hs). Nesse caso, o nível de radiação solar é alto, bem maior que (I_C), mas o sistema não bombeia (Fig. 2).

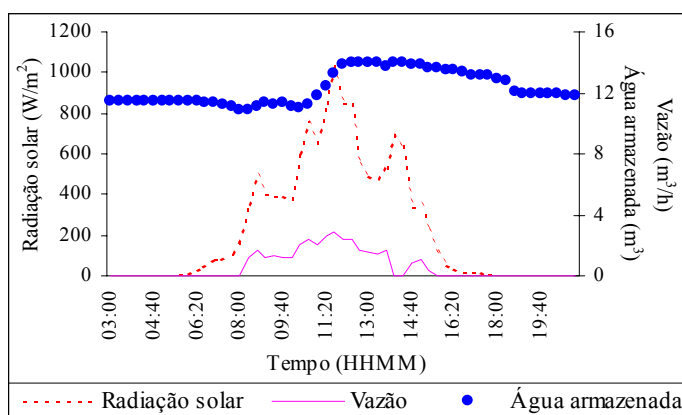


Figura 2 Corte na operação da bomba devido ao fato de o reservatório estar cheio (dia 22/03/97)

Devido a estes efeitos de corte provocados pelo sistema de controle ligado à bóia do reservatório, o volume de água bombeado, durante uma parte do ano, não segue as variações dos níveis de radiação solar. Isto é, períodos de alta insolação podem corresponder a baixos volumes de água bombeada e vice-versa. No caso do sistema analisado, esse efeito é observado no período de março-abril (Fig. 3).



Figure 3 Volume diário de água bombeada e energia solar coletada pelo sistema BFV.

Eficiência diária

Um quadro semelhante pode ser obtido analisando-se a eficiência diária do sistema, medida como a relação entre energia hidráulica e energia solar coletada.

Na Fig. 4 são apresentados os valores de eficiência diária para o mesmo período (março e abril). O máximo valor observado é de (3.1%), durante dias de baixo nível de insolação ($\cong 3000 \text{ Wh/m}^2$). Os maiores valores de eficiência diária observados indicam que o sistema operou durante boa parte do dia solar e, portanto, com baixa frequência de cortes.

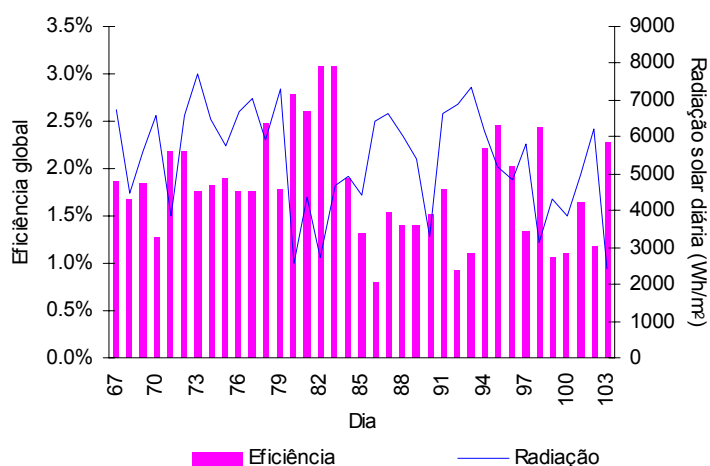


Figura 4 Eficiência diária e energia solar coletada pelo sistema BFV.

Dias com altos níveis de radiação, ao contrário, correspondem a baixos valores de eficiência, desde que durante uma fração grande de tempo o reservatório está cheio. Na mesma Fig. 4 observam-se valores inferiores a (1 %) durante dias de elevado nível de radiação solar (maior que 6000 Wh/m^2). O resultado apresentado mostra que a eficiência global de um sistema de abastecimento de água é, em média mais baixa que as eficiências normalmente apresentadas para sistemas de bombeamento fotovoltaico (3 a 5%) (Barlow et. al, 1993), que não estão sujeitos às restrições decorrentes do sistema de armazenamento.

CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

Sistemas de bombeamento fotovoltaico podem ser analisados estudando-se o comportamento de cada componente ou grupos de componentes (gerador FV, inversor, motobomba, tubulação e poço de água). Alternativamente, e esta é a aproximação utilizada neste trabalho, o comportamento desses sistemas pode ser descrito como uma relação única entre vazão de água bombeada (output, \dot{V}) e radiação solar coletada (input, I_{col}), chamada curva característica (CC).

A curva característica de um sistema de bombeamento fotovoltaico pode ser obtida diretamente, medindo-se a radiação solar coletada pelo gerador e a vazão de água bombeada. Os períodos em que o sistema se encontra desligado, devido a que o reservatório está cheio, podem ser identificados no plano ($\dot{V} \times I_{col}$) como pontos de vazão nula, localizados ao longo do eixo das abscissas ou, alternativamente, como pontos dispersos na região compreendida entre a curva característica e o eixo das abscissas. Estes últimos são obtidos como valores médios ao longo de períodos durante os quais o sistema operou parcialmente (cortes devido a que o reservatório está cheio). Desde que essa curva irá representar o comportamento do sistema de bombeamento, excluindo-se a influência do reservatório, esses pontos devem ser eliminados.

A curva característica do sistema BFV em estudo é mostrada na Fig. 5. Os pontos foram obtidos utilizando-se um sistema de aquisição de dados que registra os valores de vazão e radiação a cada 10 minutos. Os cortes devido a baixos valores de radiação (nível crítico, I_C) definem a interseção da curva característica com o eixo das abscissas. Note-se que (I_C) deve ser definido como uma média dentro de uma determinada faixa de variação que, neste caso, é igual a $(170 \pm 40 \text{ (W/m}^2\text{)})$. Na Fig. 5 indica-se também a linha de tendência da curva.

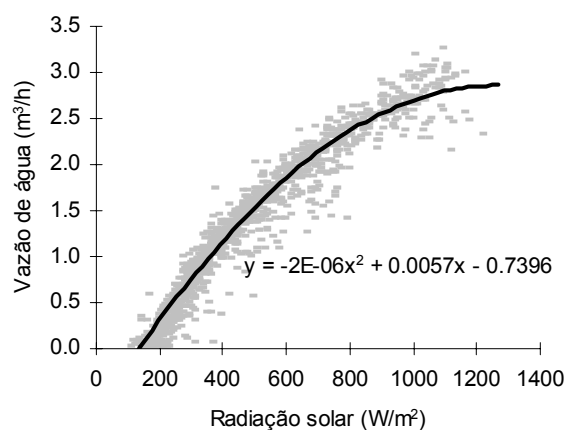


Figura 5 Curva característica do sistema BFV instalado em Inajá.

Calculo da capacidade de bombeamento e comparação com a demanda de água

A vazão de água que um sistema é capaz de bombear, sem as restrições decorrentes do tamanho finito do reservatório, pode ser estimada por meio da curva característica. Os valores de radiação solar, medidos cada dez minutos, foram utilizados para estimar a vazão de água bombeada correspondente a cada nível de radiação solar através da relação ($\dot{V} \times I_{col}$) (curva característica). Os volumes diários de água bombeada foram posteriormente calculados integrando-se a vazão ao longo de cada dia. A média do volume bombeado, em base mensal ou anual, representa a capacidade de bombeamento do sistema (V_M) (Fraidenraich e Vilela, 2000). Perfis reais e simulados de vazão de água bombeada ao longo de três dias são mostrados na Fig. 6. Como mencionado, a simulação assume que não ocorrem cortes devido a limitações em capacidade de armazenamento. Observa-se uma diferença grande entre vazão de água efetivamente bombeada e vazão simulada (sem cortes).

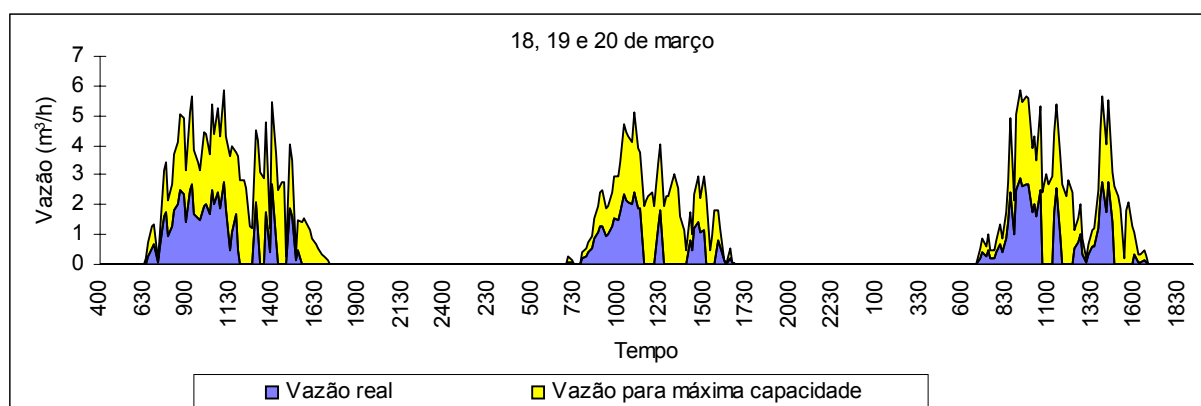


Figura 6 Vazão de água bombeada e vazão simulada.

É importante mencionar que uma análise adequada do comportamento de sistemas de abastecimento de água, em termos de oferta e demanda, requer que as precipitações pluviométricas locais sejam devidamente consideradas. Durante o primeiro período de medidas (março e abril) o índice de precipitação local é elevado (129 mm), em correspondência com um nível de radiação também alto ($5500 \text{ Wh} / \text{m}^2$). A situação durante o mês de julho é exatamente a oposta, índice pluviométrico baixo (12 mm) correspondendo a um nível de radiação solar igualmente baixo ($4400 \text{ Wh} / \text{m}^2$).

Os resultados da simulação, para o período que vai de 08 de março a 14 de abril, mostram que a capacidade de bombeamento (V_M) calculada em base diária é igual a $15,8 \text{ m}^3$ enquanto o volume de água bombeado é de $8,3 \text{ m}^3$ (Tab. 1). Durante o período de 04 a 31 de julho (período seco), a relação entre ambos parâmetros é menor, com uma capacidade de bombeamento de $13,2 \text{ m}^3$ e volume bombeado igual a $11,2 \text{ m}^3$.

Apesar de que a capacidade de bombeamento (V_M) seja maior que o volume de água efetivamente bombeado (V) durante o período seco (julho), a pequena diferença entre ambos não permite afirmar que as dimensões do sistema sejam adequadas para atender a demanda, devido tanto à variabilidade do recurso solar quanto ao fato de que o atendimento da demanda depende fortemente das dimensões do sistema de armazenamento. Para os meses de março e abril, a capacidade de bombeamento e o volume de água efetivamente bombeado apresentam uma relação bem mais ampla, o que se traduz em excesso de água que poderia ser utilizada, eventualmente, em outras atividades produtivas. Estes parâmetros serão revistos a partir dos resultados encontrados no balanço de água, que incorpora as dimensões do sistema de armazenamento (V_T).

Tabela 1 Parâmetros característicos do local e do sistema de bastecimento de água

Período	08 de Março a 14 de Abril	04 a 31 de Julho
Precipitações (mm)	129	12
Radiação solar coletada (Wh/m^2)	5.500	4.400
Volume de água bombeada (m^3/dia) (V)	8,3	11,2
Capacidade de bombeamento (V_M) (m^3/dia)	15,8	13,2

Balanço de água do sistema de abastecimento

Um balanço de água do sistema pode ser realizado utilizando a série temporal real de radiação solar coletada e a curva característica do sistema, para gerar a seqüência temporal do volume de água bombeado. Simultaneamente deve se considerar o tamanho do tanque, a quantidade de água acumulada no momento inicial da simulação e a série temporal do consumo de água. A simulação foi realizada para os dois períodos de observação, março – abril e julho, para intervalos de cada dez minutos. Devido a ausência de dados sobre a evolução do nível de água acumulada o estado inicial do tanque é desconhecido. Para superar essa dificuldade, que em uma simulação a longo prazo não apresentaria influência significativa nos resultados, foi considerado que o tanque de água está cheio no momento em que a radiação solar coletada é elevada e o volume de água bombeada é igual a zero. A partir de essa condição, que foi encontrada logo no

primeiro dia de medidas e em torno do meio-dia, inicia-se a simulação.

Nas Figs. 6 e 7 observam-se as variações da quantidade de água acumulada no reservatório ao longo dos meses de março e abril e de julho. Em ambos casos, não se verifica existência de déficit no abastecimento de água, embora a água acumulada no reservatório durante alguns períodos do mês de julho (Fig. 7) atinja níveis muito baixos.

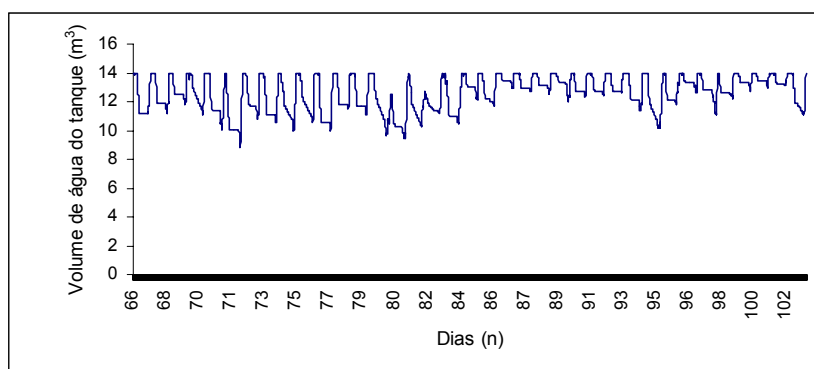


Figura 7 Variação da quantidade de água acumulada no reservatório ao longo dos meses de março e abril.

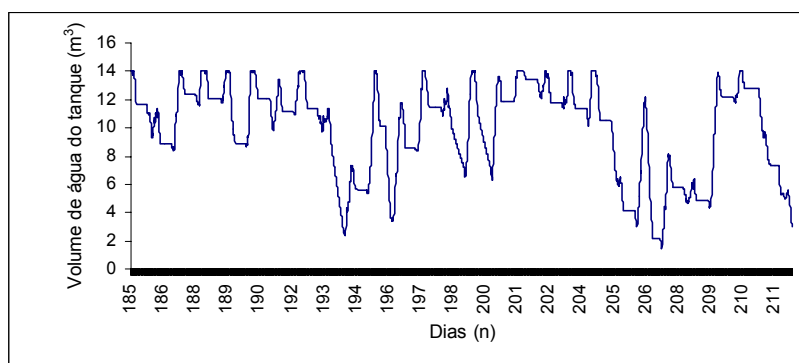


Figura 8 Variação da quantidade de água acumulada no reservatório ao longo do mês de julho.

Os resultados apresentados mostram o comportamento do sistema durante um intervalo de operação relativamente breve. Entretanto, é importante prever o comportamento a longo prazo já que, dependendo das características do sistema (capacidade de bombeamento e tamanho do tanque) e do recurso solar (comportamento estocástico), a demanda de água durante a vida útil do sistema pode não ser devidamente atendida.

Parâmetros característicos do sistema de abastecimento de água e comportamento a longo prazo

Uma forma habitual de representar as características do sistema estudado, que reúne a capacidade de bombeamento, as dimensões do tanque e a demanda, pode ser feita através dos seguintes parâmetros adimensionais, análogos àqueles utilizados em sistemas fotovoltaicos autônomos (Bucciarelli, 1984; Bucciarelli, 1986; Egido e Lorenzo, 1992):

Capacidade de bombeamento por unidade de demanda, $C_B = V_M/L$

e

Capacidade de armazenamento por unidade de demanda, $C_T = V_T/L$

No caso considerado os valores encontrados são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 Parâmetros da capacidade de bombeamento e da capacidade de armazenamento.

Período	C_B	C_T
Março – Abril	1,90	1,69
Julho	1,15	1,22

Um parâmetro adicional importante na caracterização dos sistemas analisados é o déficit no suprimento de água. Considera-se que existe déficit no abastecimento de água toda vez que o volume bombeado somado ao volume de água acumulado no reservatório é insuficiente para atender a demanda.

Utilizando uma série temporal de radiação solar para um período de 10 anos (Aguiar et. al., 1988) foi simulado o comportamento de um sistema (Vilela e Fraidenraich, 2001), cujos parâmetros médios para o mês de julho são os mesmos que os observados ($C_B = 1,15$ e $C_T = 1,22$). Assumindo que a demanda é uniforme ao longo do ano, os resultados mostram um déficit significativo no abastecimento de água. Cerca de 2,6%, quando se considera uma demanda compreendida entre 7 e 17 h, e 2,9% quando a demanda está distribuída no período das 6 às 18h.

Este resultado explica-se pelo fato de que o valor de C_B encontra-se muito próximo do valor médio da demanda (15 % a mais) e o valor de (C_T) estimado não é suficiente para amenizar as variações da quantidade de água bombeada

decorrentes da variabilidade da radiação solar. Para valores de C_B da mesma ordem que a demanda (C_B próximo de 1) os valores do parâmetro C_T que possibilitam pequenos déficits (da ordem de 1 %) devem ser bem maiores que 1,22. As simulações realizadas para o comportamento a longo prazo do sistema estudado mostram que, para C_B igual a 1,15, déficits da ordem de 1 % só ocorrem no caso em que o valor de C_T é da ordem de 2,5 dias de demanda. Cabe mencionar que os valores encontrados para o déficit no abastecimento de água são válidos para a localidade de Inajá e para sistemas com as mesmas características do estudado, em particular com abastecimento comunitário. Para sistemas com fornecimento de água através de rede hidráulica a demanda de água pode apresentar grandes variações ao longo de sua vida útil (Mushamba, 1999).

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O comportamento dinâmico de um sistema fotovoltaico de abastecimento de água foi apresentado, analisando-se os efeitos dos cortes no bombeamento devido à radiação solar (nível crítico) e ao sistema de controle associado ao reservatório de água.

Os dois períodos analisados neste trabalho apresentam diferenças importantes. Enquanto no período março - abril a radiação solar elevada combina-se com os maiores níveis de precipitação local, no mês de julho ocorre o fenômeno exatamente oposto, baixa radiação combina-se com o período seco. Podemos concluir portanto que, em termos de dimensionamento, o mês de julho é determinante.

Foram obtidos valores para o parâmetro da capacidade de bombeamento (C_B) e da capacidade de armazenamento (C_T) do sistema. Esses parâmetros mostram que o sistema pode bombear 15 % a mais de água que o efetivamente bombeado durante o mês de menor radiação solar (julho) (C_B igual a 1,15). O tanque de água é 22 % maior que a demanda (C_T igual a 1,22). A simulação a longo prazo realizada com base nesses parâmetros (C_B e C_T) mostrou a existência de um déficit significativo no abastecimento de água. Cerca de 2,6%, quando se considera uma demanda uniforme e compreendida entre 7 e 17 h, e 2,9% quando a demanda uniforme está distribuída no período das 6 às 18h. Pode se concluir portanto que, para a localidade analisada, sistemas com valores de C_B igual a 1,15 e C_T igual a 1,22 deverão apresentar déficit no seu funcionamento a longo prazo. Para que um sistema com o mesmo parâmetro de capacidade de bombeamento apresente déficits da ordem de 1 %, a capacidade de armazenamento do reservatório deveria ser da ordem de 2,5 dias de demanda.

REFERÊNCIAS

- Aguiar R. J., Collares-Pereira M. e Conde J. P. (1988). Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices. *Solar Energy*, 40, pp. 269-279.
- Barlow R., McNelis B. e Derrick A. (1993). Solar pumping. An introduction and update on the technology, performance, costs and economics. World Bank, Relatório Técnico No.168.
- Bucciarelli L. L. Jr. (1984). Estimating loss-of power probabilities of stand-alone photovoltaic solar energy systems. *Solar Energy*, 32, pp. 205-209.
- Bucciarelli L. L. Jr., (1986). The effect of day-to-day correlation in solar radiation on the probability of loss-of-power in a stand alone photovoltaic energy system. *Solar Energy*, 36, pp. 11-14.
- Egido M. e Lorenzo E. (1992). The sizing of stand alone PV-systems: a review and a proposed new method. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 26, pp. 51-69.
- Fraidenraich N. e Vilela O. C. (2000). Performance of solar systems with non linear behavior calculated by the utilizability method. Application to PV solar pumps. *Solar Energy*, 69, pp. 131-137.
- Vilela O. C. e Fraidenraich N. (2001). A Methodology for the design of PV water supply systems. *Progress in Photovoltaics*, 9, pp. 1-13.
- Mushamba P. (1996). Photovoltaic water pumping. From demonstration to dissemination. *Energy Bulletin*, Vol. 6, No. 2. Publicado pelo Ministério de Transporte e Energia de Zimbabwe, pp. 2-9.

ABSTRACT: In this paper we analyze the dynamic behavior of a photovoltaic water supply system. Records of the consumed water flow, pumped water flow and collected solar radiation were obtained for a system installed in the semi-arid region of the state of Pernambuco (city of Inajá), Brazil, during two periods, along the months of March-April and the month of July. The nominal power of the photovoltaic generator is 1,1 kW and the static level of the well is 23,7m. A storage water tank, of 14 m³ of capacity, enables to match water supply and consumption. The paper presents useful methodological tools to study the performance of the system: a) Characteristic curve of the pumping system; b) Calculation of the water pumping capacity; c) Balance between demand and water supply or, its equivalent, variation of the water volume stored in the water tank and d) Determination of parameters relative to pumping and storage capacity, which allow to predict the long term behavior of the water supply system. Estimates using the measured data show that the system can pump 15% more water than the volume effectively pumped during the month of lowest solar radiation along the year (July). The volume of the water tank is 22% larger than the demand of the same period. Although the pumping capacity during that month is larger than demand, and no water deficit have been observed, results of a simulation show that systems with those characteristics will experience, in the long term, deficit in water supply.

Keywords: Photovoltaic-pumping-1:Water-supply-2: Performance-3